

文章编号 1004-924X(2018)11-2723-09

氮化硅陶瓷水射流辅助激光精密加工

姚燕生^{1*}, 陈庆波¹, 汪俊¹, 陈雪辉¹, 袁根福²

(1. 安徽建筑大学 机械与电气工程学院, 安徽 合肥 230022;

2. 江南大学 机械工程学院, 江苏 无锡 214122)

摘要:为解决工程陶瓷在激光加工中的表面质量问题提出了溶液辅助激光加工方法,首先在综合国内外有关研究的基础上,分析了激光穿越水层的能量传输、激光作用水下固体物质的热传导和静水及水射流辅助激光加工的作用机理;搭建了旁轴射流与超声振动辅助激光复合加工系统,开展了不同加工条件下氮化硅陶瓷刻槽对比试验。借助扫描电子显微镜检测分析激光刻蚀槽体形貌,运用激光共聚焦显微镜观测了槽体截面轮廓。研究表明,水射流辅助激光加工氮化硅陶瓷,因激光穿越水层、水的对流冷却等作用减少了激光烧蚀材料的有效能量,刻蚀深度有所降低;同时由于水层的存在改变了加工区域能量分布,使得槽口变宽。当激光电流 200 A、频率 50 Hz、脉宽 0.6 ms 时刻槽深度相对减小 30%,宽度增大 21%。水与氮化硅在激光作用下的会发生水解等效应,且水蒸汽、材料蒸汽、熔融粒子、气泡等沿水流动方向被带走,有利于表面质量的提高,综合效果良好。

关键词:水射流辅助激光加工;表面质量;试验研究;氮化硅

中图分类号: TG665 文献标识码: A doi:10.3788/OPE.20182611.2723

Water-jet assisted laser precision processing of Si₃N₄ ceramics

YAO Yan-sheng¹, CHEN Qing-bo¹, WANG Jun¹, CHEN Xue-hui¹, YUAN Gen-fu²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering,
Anhui Jianzhu University, Hefei 230022, China;

2. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

* Corresponding author, E-mail: y.ys@163.com

Abstract: Solution-assisted laser processing was proposed to solve the problem of surface quality in engineering ceramics during laser processing. First, the energy transfer of the laser through a water layer, heat transfer of the laser acting on an underwater solid matter, and action mechanism of the auxiliary laser processing of the hydrostatic water and water jet were analyzed after referring to relevant research at home and abroad. A complex beam-processing system of the parabola jet and ultrasonic-vibration-assisted laser was constructed, and silicon nitride ceramics were tested under different processing conditions. Scanning electron microscopy was used to detect the morphology of the grooves, and the contour of the cut section was observed using a laser-scanning confocal microscope. Our research shows that the absorption and convection of water reduce the effective energy of the laser ablation materials and the etching rate during the water-jet-assisted laser processing of silicon nitride ceramic materials. Simultaneously, owing to the existence of a water layer, the

收稿日期:2018-05-09;修订日期:2018-06-11.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 511752290);安徽省自然科学基金资助项目(No. 1208085ME79)

energy distribution in the processing area changes, which results in widening of the notch. The groove depth decreases by 30% and the width increases by 21% when the laser current is 200 A, frequency is 50 Hz, and pulse width is 0.6 ms. Because the water and silicon nitride are hydrolyzed by the laser action, water vapor, material steam, molten particles, bubbles, and others are washed away in the water-flow direction, which is beneficial for the improvement in the processing efficiency and surface quality.

Key words: water jet assisted laser processing; surface quality; experimental research; Si_3N_4

1 引言

工程陶瓷按化学组成可分为金属氧化物、氮化物、碳化物等,具有在高温下强度高、硬度大、抗氧化、耐腐蚀、耐磨损、抗热振性好和密度小、热膨胀系数小等优点,广泛用于航空航天、机械、冶金、化工、电子等领域。工程陶瓷结构依靠烧结成型,其脆性大、韧性差。对后期需要加工的器件主要工艺为电火花加工技术或金刚石等超硬刀具进行切削或磨削,但加工效率低,容易产生崩碎损伤和表面裂纹^[1-2],一些因工具头无法触及的孔槽则无法加工。利用高功率密度的微细激光束辐射工件和激光与工件的相对运动,使材料有序地熔化、气化或分解的激光加工技术,已成为工程陶瓷精密加工有效的手段。

皮秒级和飞秒级超快脉冲激光用于制造超精密微纳米结构的加工精度与表面质量较高,但设备成本高、加工速率低,很少用于陶瓷器件结构制造。而在空气中采用微纳秒激光加工陶瓷材料存在熔渣过多、表面裂纹等表面质量问题^[3-4],为此针对不同陶瓷寻求合适的激光加工参数组合和新方法成为主要解决手段。早在上世纪有研究者提出液态水辅助激光加工陶瓷的方法^[5],该方法对一些材料能很好地提高表面精度、提高加工效果,可进行金属、合金、聚合物、半导体、玻璃和陶瓷的表面清洗、冲击处理、蚀刻、焊接、钻孔、切割、微加工等^[6-7]。

水辅助激光加工是一种研究最多的液流辅助激光制造方法^[8-11],其中水与激光复合的方式主要有三大类:材料水下浸没式^[12]、水导引激光(同轴水射流)^[13]、旁轴水射流式^[14]。水下浸没式加工一般是在静水环境下进行的,水面的不稳定对光的传导不利,水层中产生的气泡对激光的散射有很大影响;水导引激光加工在瑞士联邦工业学

院的推进下,该技术已较为成熟,但对设备要求较高。旁轴水射流通过水射流装置与激光设备直接拼接而集成一体,因简单、实用而成为研究热点。

本文首先对水辅助激光加工机理进行了研究分析,而后在常规旁轴水射流辅助激光加工技术上进行一定改进,构建了水射流与超声振动辅助激光复合加工装置;选择被称为万能陶瓷的氮化硅材料开展试验研究,深入探索其复合精密加工特性,实现加工速度与表面质量综合优化。

2 水下激光加工理论

2.1 激光在水中的能量传输特性

激光束照射液体下固体物质的能量传输如图 1 所示。激光照射于液面,部分会被液面反射;在穿越液体层作用于固体材料过程中,存在被吸收和散射而损失能量。激光作用于固体材料也存在吸收、反射,对陶瓷来说绝大部分能量会被材料吸收。

单纯考虑液体对激光能量的吸收,根据 Beer-Lambert 法则^[15],水下激光能量的变化有:

$$I_x(\lambda) = I_0(\lambda) \exp\left[-\frac{x}{\Delta}\right], \quad (1)$$

其中: $I_x(\lambda)$ 为在水中传输路程为 x 后的激光能量; $I_0(\lambda)$ 激光到达水面表层的能量; x 为在水中传输路程; Δ 为激光在水中的吸收长度,即激光被完全吸收穿过的水长度。

根据有关研究^[16]发现蓝绿激光在水中穿越长度大,即水对蓝绿光吸收小。现实中,综合考虑被加工材料、激光设备等因素,将水层控制在 1 mm 以内,多数工业激光器都可以进行水下加工。

由光散射理论,当粒径参数 F 远小于 0.1 时,激光在液体传输中散射的类型为瑞利散射;当 F 大于等于 0.1 时,散射类型为米氏散射。水介

质中杂质较少, 多为水分子造成的散射, 其微粒的大小比入射光的波长小的多, 可以用瑞利散射理论来解释, 这时的激光散射能量较小, 在加工中可以被忽略。

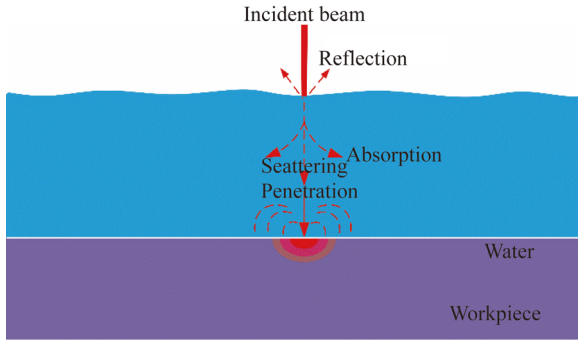


图 1 激光在水中的能量传输
Fig. 1 Laser energy transfer in liquids

2.2 水中材料激光加工的热传导特性

由于水的对流热交换系数远高于空气, 水下固态材料激光加工位置的热对流对温度场影响极大, 对激光水下复合刻槽加工过程进行建模需要考虑水的对流所带来的影响。由参考文献[17]建立光束能量为高斯分布的激光铣削时烧蚀前沿材料平面微元的流动水下热平衡关系, 如式(2)所示:

$$Q = \alpha J_0 e^{-(x^2 + y^2)/R^2} dx dy - h(T - T_0) dx dy = \rho L v dx dy \tan \theta - k \left(\frac{dr}{dn} \right)_{n=0} dx dy (1 + \tan^2 \theta + \tan^2 \varphi)^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

其中: h 为对流热交换系数。 α 为材料吸收率(导热能力); J_0 为激光功率密度峰值; R 为光斑半径; L 为融化潜热; v 为光束移动(扫描)速度; x, y 水平方向坐标; θ, φ 为平面微元与 x, y 轴的夹角; n 为法向坐标; T_0 为初始温度(环境温度); T_s 为转变温度; T 为材料温度。

式(2)可进一步整理为:

$$\alpha J_0 e^{-(x^2 + y^2)/R^2} dx dy - h(T - T_0) dx dy = \rho L v dx dy \tan \theta + \rho v c_p \tan \theta (T_s - T_0) dx dy, \quad (3)$$

其中 c_p 为比热容。

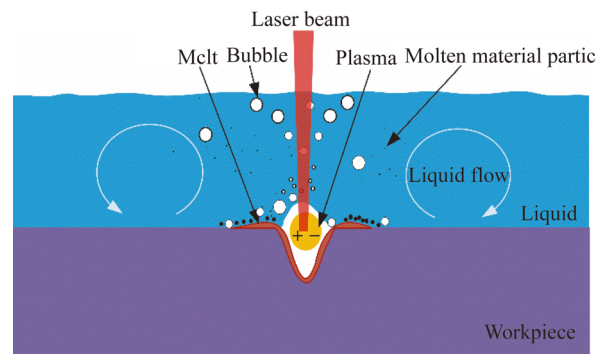
可求得激光刻槽时 $\tan \theta$ 的表达式, 复合刻蚀加工槽深 $S = \int_{-\infty}^{\infty} \tan \theta dx$, 在 $y=0$ 位置上激光刻蚀深度最大:

$$S = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\alpha J_0 e^{-x^2/R^2} - h(T - T_0)}{\rho v (L + c_p (T_s - T_0))} dx, \quad (4)$$

其中: 材料表面温度 T 为 x 的函数, 对流热交换系数 h 随表面温度和水层参数(流动速度、厚度、压力等)而变化, 若按强制对流模式其值在 $1\ 000 \sim 15\ 000\ J/(m^2 \cdot s \cdot ^\circ C)$ 范围内变化。上式可定性分析对流热量对深度的影响。

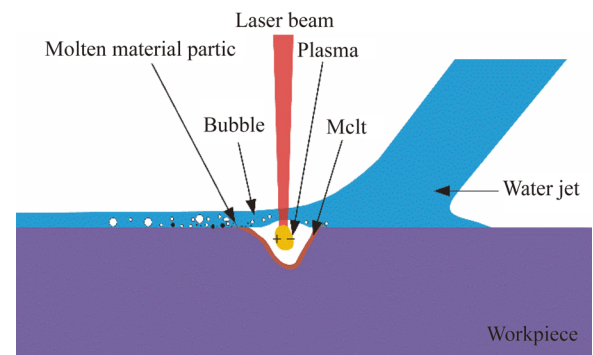
2.3 水辅助激光加工机理分析

水辅助激光加工过程中, 在液固界面时会伴随着一系列复杂的声、光、热、机械等物理效应和化学反应, 而且激光加工参数和辅助液体参数不同, 所对应的加工过程也会有一定的不同。结合国内外有关液体辅助激光加工分析研究^[6, 18-19], 本文针对一般情况, 分别建立静水辅助激光加工模型(如图 2(a))和水射流辅助激光加工模型(如图 2(b)), 基本条件为激光焦点在工件表面或附近, 激光束垂直通过水体而作用于工件, 激光能量足以产生等离子体和材料刻蚀。因水射流到达材料的表面会产生流场变化, 水面的动态变化会影响激光加工的稳定性的, 需要用一定压力的气流压制激光作用区域水层。



(a) 静水辅助激光加工模型

(a) Model of quiescent water assisted laser processing under water



(b) 水射流辅助激光加工模型

(b) Model of water jet assisted laser processing

图 2 水辅助激光加工原理图

Fig. 2 Schematic of underwater laser processing

当光束焦点在水中,激光能量密度超过水的击穿阈值,则水会发生光学击穿、产生等离子体,此时激光能量主要作用于水层而不利于水下材料加工,所以宜将激光聚焦点设置在固液结合面或以下。在焦点处的材料被强激光辐照后发生熔化、汽化、分解,并会导致电离形成高温高压等离子体,由于等离子体对激光能量的吸收率比水要大很多,之后的激光脉冲能量主要被等离子体吸收^[20],水层覆压下的等离子体膨胀,在水内形成强烈的超声波冲击,继而产生空泡现象^[21],空泡经历多次扩张、收缩和溃灭,产生空泡冲击。激光作用材料处和等离子体区的热量使材料发生熔化、汽化或分解的同时,高温界面附近的水在极短时间内沸腾喷发,水蒸汽、材料蒸汽、熔融粒子、气泡等喷射而出,已有研究^[22]表明,在这个过程中可能会出现匙孔现象。水的冷却作用促进抛出材料凝结和热影响区减小,在等离子冲击、超声波冲击、空泡冲击等综合作用下,将激光烧蚀产物更有效地去除和转运,有助于熔渣从加工区排出,避免熔融物沉积,提高了加工效果。对于某些液体和被加工固体材料,还会在高温下发生化学反应,显著提高了表面加工质量。液体辅助加工带来有益效应的同时,也存在如 2.2 节中分析液体带来的刻蚀能量损失减弱,激光热去除作用;另外复合加工过程中生成的大量气泡,对光束的反射、散射等作用减弱了激光能量的传输。

结合大量理论分析、实验和仿真研究,建立水射流辅助激光加工模型如图 2(b)。其中,喷嘴与工件保持一定角度和距离沿激光刻槽方向运动,通过水射流冲击在材料表面形成稳定流速的层流水膜;激光穿过水膜聚焦于工件上,激光作用于材料处和等离子体区的热量使材料发生熔化、汽化或分解,由于水射流的作用,水蒸汽、材料蒸汽、熔融粒子、气泡等随水流动方向被带走,避免了在槽内和槽两侧形成熔渣堆积和气泡对光束的反射、散射等作用,同时等离子区还被压缩变扁。当水压较高时水的动能对材料除冲刷冷却作用外还具有蚀刻作用,有利于激光加工效率的提升。

以上分析可知,合理控制激光加工参数、液流参数等,利用激光脉冲周期内,液流冷却、多种冲击、化学腐蚀对加工区域的综合作用,可提高材料激光加工能力与效果。

3 水射流辅助激光加工试验

为深入探索氮化硅陶瓷等硬脆性材料激光精密加工新技术新方法,近年来本课题组搭建了旁轴射流与超声振动辅助激光复合加工系统,开展了系统的试验研究^[23-24]。

在试验系统中,束状射流跟随激光头的加工路径,以一定的流速且与激光头保持适当夹角喷射到材料表面激光焦点附近;为减少水对光束能量的吸收,有利加工中产生的气泡等被水流带走,利用激光设备的同轴辅助气流(压缩空气)控制水膜层厚,从上方压制水层使之贴合材料表面从而保持稳定。超声振动装置中,超声波发生器驱动安装在振板上的压电换能器,迫使试样做垂直方向振动;其中超声波发生器为数字式他激,其输入电压:AC220±10 V,频率:13~75 kHz,输出功率:0~300 W。激光系统使用 HGL-VIB 型 Nd:YAG 固体脉冲激光加工机,其最大电流为 400 A,激光器最大功率为 500 W,激光波长 1.064 μm,水对这种激光的吸收率相对较小。

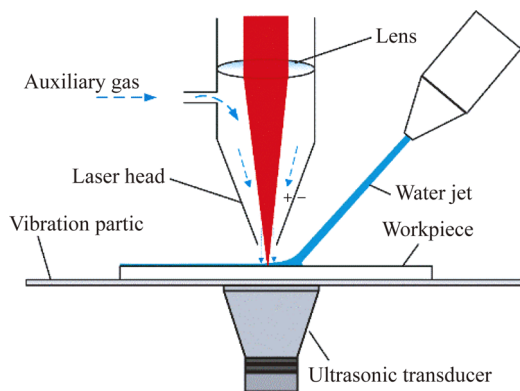


图 3 新型水射流辅助激光加工系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of a novel device of water-assisted laser processing

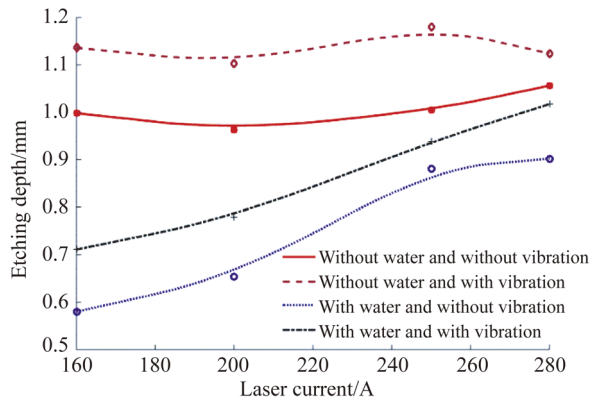
试样材料选用气压烧结合氮化硅(物理特性如表 1),采用光学显微镜进行激光加工结果的观察测量,再利用 SEM 和高精度的 OLS5000 激光共聚焦显微镜检测试样,尤其是槽面的微观形貌和横向轮廓,对其进行分析研究。在作者发表的文献^[24]中研究了水射流辅助激光加工的氮化硅高温水解过程,生成白色二氧化硅固态粉末和氨气,本文不再研究分析。

表 1 氮化硅的物理常数
Tab. 1 Physical constants of Si₃N₄

Material	Density /(g·cm ⁻³)	Hardness /HRA	Elastic modulus /MPa	Poisson ratio	Sublimation temperature/°C	Specific heat capacity /(J·(g·K) ⁻¹)	Coefficient of thermal conductivity /(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	Coefficient of linear expansion/°C
Si ₃ N ₄	3.2	90~92	(2.9~3.2)×10 ⁵	0.25	1 900	0.71	23~28	2.8×10 ⁻⁶

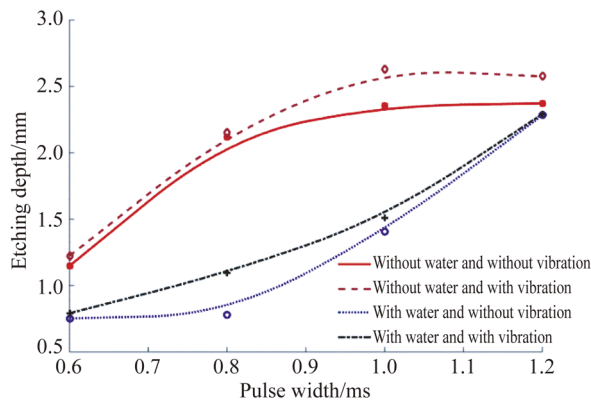
4 试验结果与分析

课题组通过不同条件下不同加工参数组合试验,工艺参数基本组合为激光电流 200 A、激光频率 50 Hz、激光脉宽 0.6 ms、超声功率 83.6 W、射流速度 15 m/s、射流角度 60°、移动速度 1 mm/s、辅助气体压力 0.5 MPa、喷嘴直径 1 mm。随后变化其中一项激光参数进行试验,为保证测得刻槽深度准确性,避开起始处激光不稳定所带来的误差,通过共聚焦显微镜测量稳定加工区段多个截面深度后算出平均值,最后得到相应的刻槽加工变化规律如图 4。



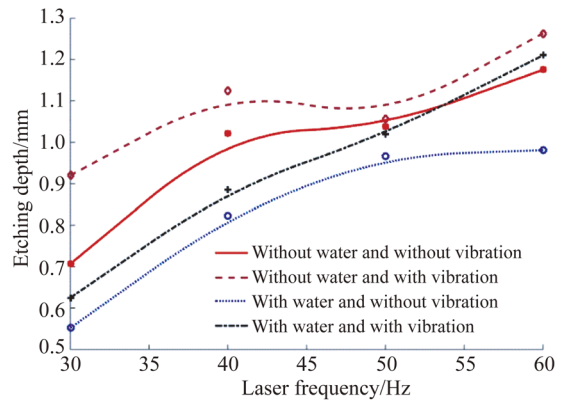
(a)激光能量对刻槽深度的关系

(a)Relationship between laser energy and groove depth



(b)激光脉宽对刻槽深度的关系

(b)Relationship between laser pulse width and groove depth



(c)激光重复频率对刻槽深度的关系

(c)Relationship between laser repetition frequency and groove depth

图 4 不同复合加工形式与激光参数对刻槽深度的影响
Fig. 4 Influence of different composite processing forms and laser parameters on groove depth

结果显示,在一定参数范围内,随着激光能量、脉宽、激光重复频率增高,刻槽深度有所增大;因水层削减激光加工的能量,故有水辅助加工时 V 型槽深小于无水条件时刻蚀深度,但加入振动后对槽体深度值有一定提高。

为进一步观察加工结果,了解加工过程与作用机理,采用电子显微镜(SEM)从槽体正面观测其微观结构(如图 5),利用激光共聚焦显微镜获得刻槽剖面线(如图 6)。对氮化硅本体材料,单纯激光加工时得到的 V 型槽两侧凝结物较多,在槽体侧面呈现树突状(如图 5(a)),大量残渣对槽宽和槽深有明显影响,通过测量槽体宽度为 141 μm,深度约为 1 002 μm;在此基础上加入超声振动希望增强激光烧蚀残渣的脱离与抛出,以提高加工速率与表面质量,试验结果见图 5(b)和图 6(b),槽体尺寸相对小幅增加,宽度约为 147 μm,深度约为 1 150 μm,但凝结颗粒直径变大。

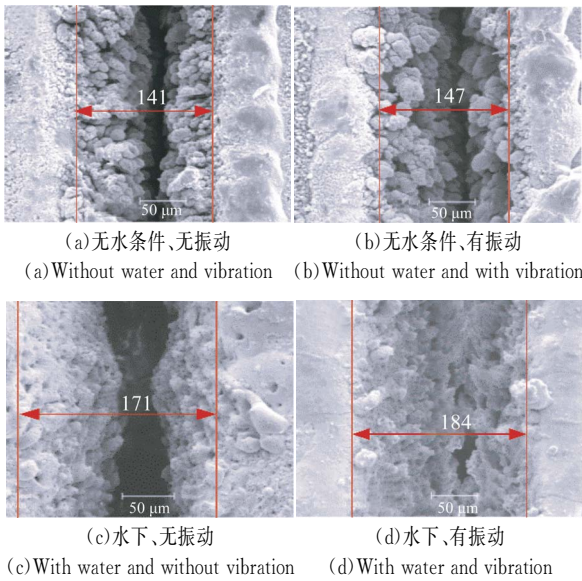
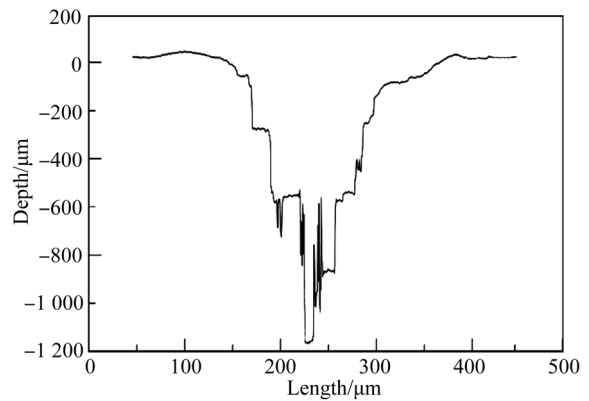


图 5 不同激光加工方式下 Si_3N_4 陶瓷加工后 SEM 照片 (激光电流 200 A、激光频率 50 Hz、激光脉宽 0.6 ms、超声功率 83.6 W、射流速度 15 m/s、射流角度 60° 、移动速度 1 mm/s、辅助气体压力 0.5 MPa)

Fig. 5 SEM images of Si_3N_4 ceramics after different laser processing. (Laser current with 200 A, laser frequency with 50 Hz, laser pulse width with 0.6 ms, ultrasonic power with 83.6 W, jet velocity with 15 m/s, jet angle with 60 degrees, moving speed with 1mm/s, auxiliary gas pressure with 0.5 MPa)

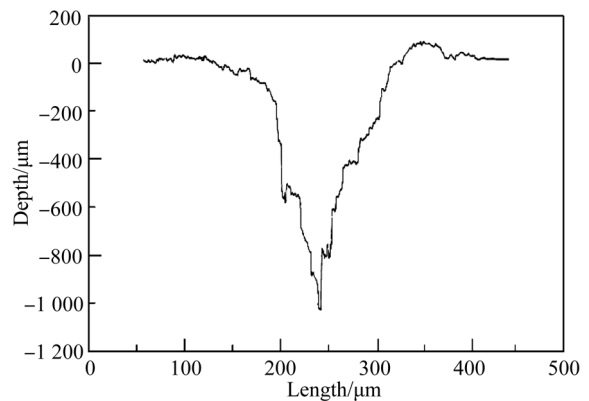
采用旁轴射流式水下激光加工时,水流痕迹明显、凝结物大大减少,槽口宽度达到了 $171 \mu\text{m}$,深度减小到 $701 \mu\text{m}$,总体结构清晰(如图 5(c)),观察到槽体侧面的凸包具有前倾趋势,体现水射流的冲击作用。图 5(d)试验中施加了工件超声振动,振动加剧了物质的运动,加强了加工表面与水接触,从而加快氮化硅水解,理论上作用效果更好,此时刻槽宽度约为 $184 \mu\text{m}$,槽深为 $750 \mu\text{m}$ 。但在此种条件下,水与激光刻蚀氮化硅的情况较复杂^[25],会产生 3 种形态的硅,还有二氧化硅和硅胶等混合物。在实际中若槽深较大或振动能量传递不足等造成这些产物不能很好地脱离与抛出,则会出现侧面颗粒变形、撕裂、拉长凝结成絮状(如图 5(d))等微观结构。将图 5 中(a)、(b)和(c)、(d)对比,可以发现在有水环境下,槽口两端

较为平整,没有熔渣堆积,经测量有水加工的槽宽相对无水时均有所增大,图 5(c)较图 5(a)槽体宽度增加了约 21%,槽体深度降低了 30%;图 5(d)较图 5(b)槽体宽度增加了约 25%,槽体深度降低了约 34%;图 5(d)较图 5(c)槽体宽度增加了约 7%。主要原因是:水射流冲击到材料后散开流动覆盖激光光斑,而由于水流的表面并非理想平面而影响激光光束传输,导致激光作用区域及能量分布被改变而产生烧蚀面积扩大,导致刻蚀槽变宽;由于水层的覆盖原因,等离子区受压扁膨胀,高温作用区和各种冲击力均有改变,对被加工材料加大了去除作用;高温下水与氮化硅发生水解,且水射流的冲击力可以更好地去除材料,促进槽口变宽。对比图 6(c)和图 6(d),发现振动的加入导致切槽斜面粗糙度变大。以上观测结果与前述的水流辅助激光加工的机理相互验证。



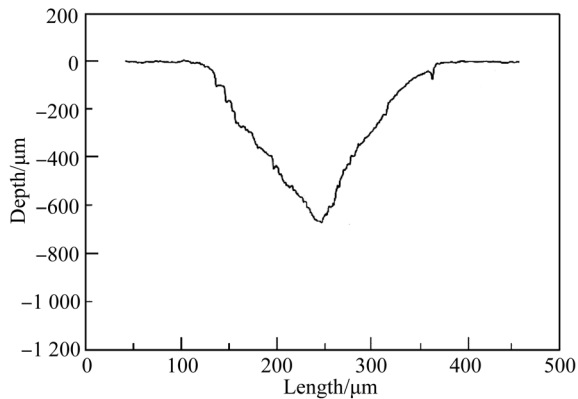
(a) 无水条件、无振动

(a) Without water and vibration



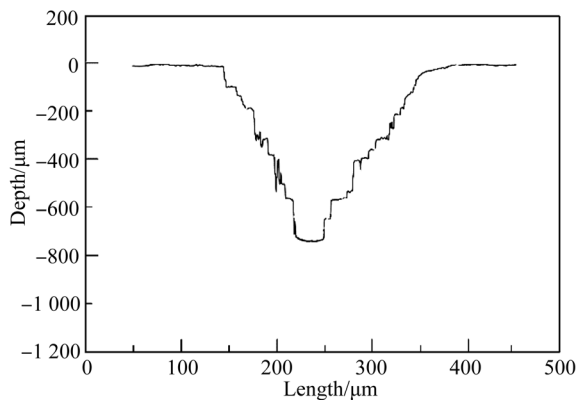
(b) 无水条件、有振动

(b) Without water and with vibration



(c) 水下、无振动

(c) With water and without vibration



(d) 水下、有振动

(d) With water and vibration

图 6 激光共聚焦显微镜下切槽剖面线

Fig. 6 Section line of grooves under confocal laser scanning microscope

5 结 论

本文针对水辅助激光加工陶瓷材料,研究了激光传输、流动液下热对流与热传导的模型,深入分析了静水辅助激光加工和水射流辅助激光加工固体材料的作用过程与机理,开展了多种参数下氮化硅水射流辅助激光刻槽对比试验,观测分析了表面形貌和内部轮廓。得到以下结论:在水射流辅助激光加工不加入振动下,因光束穿越水层、水的对流冷却等作用减少了激光烧蚀材料的有效能量,刻槽深度降低,但随脉冲能量的提高逐渐接近单纯激光加工值。在有水加工时,由于激光作用区域及能量分布发生变化、等离子区受压膨胀、水解及射流冲击作用,使得槽宽增加。当激光电流 200 A、频率 50 Hz、脉宽 0.6 ms 时刻槽深度相对减小 30%,宽度增大 21%。槽体内部和槽口光较为光滑,粗糙度明显降低,表明在水与激光的综合作用下对氮化硅材料激光水下加工总体效果有利,对提高表面加工质量有重要作用。在水下激光加工中辅以超声振动加工氮化硅陶瓷,高频振动有促进了产物的抛出、水解反应,一定程度上相对于水辅助加工提高了刻蚀速率(刻槽深度),但同时振动带来凝结物絮状分布影响加工表面粗糙度。

参考文献:

- [1] 唐修检,刘谦,田欣利,等. 切向载荷作用下氮化硅陶瓷崩碎损伤规律与机理 [J]. 光学精密工程, 2015, 23(7):2023-2030.
TANG X J, LIU Q, TIAN X L, *et al.*. Regulation and mechanism of edge chipping for Si_3N_4 ceramics worked by sliding loads regulation and mechanism of edge chipping for Si_3N_4 ceramics worked by sliding loads [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(7): 2023-2030. (in Chinese)
- [2] 饶小双,张飞虎,刘立飞,等. 电火花机械复合磨削反应烧结 SiC 陶瓷的表面特征 [J]. 光学精密工程, 2016, 24(9):2192-2199.
RAO X SH, ZHANG F H, LIU L F, *et al.*. Surface characteristics for RB-SiC ceramics by electrical discharge diamond grinding [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(9):2192-2199. (in Chinese)
- [3] MURRAY A J, TYRER J R. Nd:YAG laser drilling of 8.3 mm thick partially stabilized tetragonal zirconia-control of recast layer microcracking using localized heating techniques [J]. *Journal of Laser Applications*, 1999, 11(4):179-184.
- [4] DUBEY A K, YADAVA V. Laser beam machining—A review [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2008, 48(6):609-628.
- [5] MORUTA N, ISHIDA S, FUJIMORI Y, *et al.*. Pulsed laser processing of ceramics in water [J]. *Applied Physics Letters*, 1988, 52(23):1965-1966.
- [6] BEHERA R R, SANKAR M R. State of the art on under liquid laser beam machining [J]. *Materials Today Proceedings*, 2015, 2(4-5):1731-1740.

- [7] KRUSING A. Underwater and water-assisted laser processing: Part 1—general features, steam cleaning and shock processing [J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2004, 41(2):307-327.
- [8] FENG S, HUANG C, WWANG J, *et al.*. Investigation and modelling of hybrid laser-waterjet micromachining of single crystal SiC wafers using response surface methodology [J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2017, 68:199-212.
- [9] KRSTULOVIC N, SHANNON S, STEFANUIK R, *et al.*. Underwater-laser drilling of aluminum [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 69(5-8):1765-1773.
- [10] 陈笑. 高功率激光与水下物质相互作用过程与机理研究 [D]. 南京:南京理工大学, 2004.
CHEN X. *Studies on Mechanisms of the Interaction Between High-Power Laser and Matter in Water* [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2004. (in Chinese)
- [11] MULLICK S, MADHUKAR Y K, ROY S, *et al.*. An investigation of energy loss mechanisms in water-jet assisted underwater laser cutting process using an analytical model [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacturing*, 2015, 91:62-75.
- [12] GARCIAGIRON A, SOLA D, PENA J I. Liquid-assisted laser ablation of advanced ceramics and glass-ceramic materials [J]. *Applied Surface Science*, 2016, 363:548-554.
- [13] 李灵, 杨立军, 王扬, 等. 水导激光微细加工中激光与水束光纤耦合技术 [J]. *光学精密工程*, 2008, 16(9):1614-1621.
LI L, YANG L J, WANG Y, *et al.*. Laser and water-jet fiber coupling technology for water-jet guided laser micromachining [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(9):1614-1621. (in Chinese)
- [14] 陈雪辉, 袁根福, 郑伟. 水射流辅助激光刻蚀 Al₂O₃ 陶瓷的试验研究 [J]. *中国机械工程*, 2013, 24(12):278-284
CHEN X H, YUAN G F, ZHENG W. Experimental investigation of water jet-assisted laser etching on Al₂O₃ ceramics [J]. *China Mechanical Engineering*, 2013, 24(12):278-284. (in Chinese)
- [15] 朱波, 齐立涛, 王扬. 水辅助激光加工技术的实验研究 [J]. *现代制造工程*, 2003(12):73-74.
ZHU B, QI L T, WANG Y. The experimental study of water-assisted laser machining [J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2003(12):73-74. (in Chinese)
- [16] 李田泽. 激光的水下传输特性及其在测量中的应用 [J]. *应用光学*, 1998(1):17-21.
LI T Z. Laser transmission property in water and its application in measurement [J]. *Journal of Applied Optics*, 1998(1):17-21. (in Chinese)
- [17] 虞钢, 虞和济. 激光制造工艺力学 [M]. 北京:国防工业出版社, 2012.
YU G, YU H J. *Laser Manufacturing Technology* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012. (in Chinese)
- [18] 印四华, 郭钟宁, 陈铁牛, 等. 水下激光加工的爆发沸腾实验研究 [J]. *电加工与模具*, 2016(3):36-41.
YIN S H, GUO ZH N, CHEN T N, *et al.*. The explosive boiling experiment study on underwater laser processing [J]. *Electromachining & Mould*, 2016(3):36-41. (in Chinese)
- [19] 曹州权, 谢小柱, 陈蔚芳, 等. 液体辅助激光加工过程中压力检测及应用研究进展 [J]. *光电工程*, 2017, 44(4):381-392.
CAO ZH Q, XIE X ZH, CHEN W F, *et al.*. Research progress of pressure detection and applications in liquid-assisted laser machining [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, 44(4):381-392. (in Chinese)
- [20] 王晓宇, 王江安, 宗思光, 等. 水下光击穿的能量分布研究 [J]. *中国激光*, 2013, 40(10):33-37.
WANG X Y, WANG J A, ZONG S G, *et al.*. Research on energy distribution after laser-induced optical breakdown underwater [J]. *Chinese J of Lasers*, 2013, 40(10):33-37. (in Chinese)
- [21] OSTROVSKAYA G V. Efficiency of optical-to-acoustic energy conversion upon the interaction of a pulsed laser radiation with a liquid; I. Calculation of the efficiency upon acoustooptic interaction [J]. *Technical Physics*, 2002, 47(10):1299-1305.
- [22] YAN Y, LI L, Sezer K, *et al.*. CO₂ laser underwater machining of deep cavities in alumina [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2011, 31(15):2793-2807.
- [23] YAO Y S, YUAN G F, CHEN X H, *et al.*. Study on ultrasonic assisted laser under liquid processing platform [J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 765-767:3090-3093.
- [24] YAO Y S, WANG Y Y, LI X Y, *et al.*. Study on ultrasonic-assisted laser machining of Si₃N₄ [J]. *Key Engineering Materials*, 2016, 693:914-921.

- [25] 姚燕生,袁珠珠,王园园,等. 氮化硅陶瓷水下激光与超声复合加工方法及其机理研究 [J]. 机械工程学报, 2017, 53(7):207-216.
YAO Y SH, YUAN ZH ZH, WANG Y Y, *et al.*.

Research on ultrasonic-laser machining underwater and its mechanism for silicon nitride ceramics [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(7):207-216. (in Chinese)

作者简介:



姚燕生(1973—),男,安徽枞阳人,博士,教授,2003年于合肥工业大学获得硕士学位,2006年于中国科学技术大学获得博士学位,主要从事特种加工方面的研究。E-mail:y.ys@163.com



陈庆波(1993—),男,安徽宿州人,硕士研究生,2016年于安徽建筑大学城市建设学院获得学士学位,主要从事激光精密加工研究。E-mail:380430302@qq.com